

## Модель канала управления беспилотного летательного аппарата для исследования декодера турбокодов

С. Ф. Галиев, email: gsf76@mail.ru<sup>1</sup>

Н. Д. Горбуков, email: vknicky@yandex.ru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)

<sup>2</sup> ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)

**Аннотация.** *Рассматривается подход к проведению исследования методов кодирования команд управления в командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотным летательным аппаратом (БЛА). Приводится описание структуры канала управления и его модели для проведения исследования работы декодера.*

**Ключевые слова:** *Беспилотный летательный аппарат, модель канала управления, турбокоды.*

Организация защиты канала управления БЛА от помех накладывает свои особенности на разработку и построение устройства приема команд на борту БЛА [1, 2]. В условиях ограничения массы, габаритов и мощности потребляемой электрической энергии возникают технологические трудности в создании аппаратуры, удовлетворяющей всем требованиям. Одной из задач является выбор оптимальной сигнально-кодовой конструкции радиосигнала (вид модуляции, ширина полосы сигнала, метод кодирования потока информации) и реализация декодера, устанавливаемого на борт БЛА. Для этого предлагается рассмотреть модель работы канала «кодирования – декодирования» сложного по структуре сигнала. Предлагаемая модель позволяет оценить не только вероятность правильного декодирования команды, принимаемой на борту БЛА, но и требуемые вычислительные затраты для разработки декодера приемного тракта. В общем результате можно косвенно оценить энергетические затраты на работу декодера и сформировать структуру декодера.

Одним из способов обеспечения качественной связи на большем удалении является использование особой сигнально-кодовой конструкции с применением турбокодов [3]. Турбокоды являются блоковыми систематическими кодами и позволяют обеспечить помехоустойчивость передачи информации по эфиру близкую к теоретической. Их построение производится с использованием рекурсивных сверточных кодов, которые могут быть представлены в

виде линейного регистра сдвига с обратной связью, то есть в рекурсивном коде учитываются выходные биты информации.

На рис. 1 показана структура канала управления, поясняющая состав элементов, участвующих в формировании и трансформации сигнально-кодовой конструкции данных. Входная и выходная последовательности кодера представляет структуру данных (кодовое слово)  $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{k-1}]$  и  $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{k-1}]$ , где  $\mathbf{u}_i = [u_i^{(0)}, \dots, u_i^{(b-1)}]$

и  $\mathbf{v}_i = [v_i^{(0)}, \dots, v_i^{(c-1)}]$  – матрицы бинарных величин двоичного кода. На каждый блок из  $b$  входных бит кодер генерирует  $c$  выходных значений.

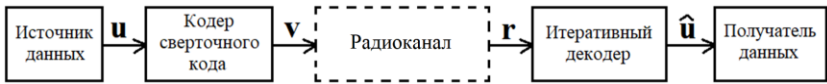


Рис. 1. Структура канала управления с трансформацией сигнально-кодовой конструкции данных

При передаче данных радиоканал рассматривается как канал с аддитивным белым Гауссовским шумом. В результате передачи по радиоканалу на входе декодера принимаемая посылка информации будет описываться матрицей  $\mathbf{r}_i = [r_i^{(0)}, \dots, r_i^{(c-1)}]$ , где  $r_i^j = v_i^{(j)} + n_i^{(j)}$ ,  $n_i^{(j)}$  – независимая Гауссовская величина с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью мощности шума равной  $N_0/2$ .

В нашей модели канала плотность условной вероятности для величины  $r_i^j$  определяется выражением

$$P\left(r_i^{(j)} \mid v_i^{(j)}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (r_i^{(j)} - v_i^{(j)})^2}, \quad (1)$$

где дисперсия шума  $\sigma^2 = N_0/2 E_b$ , а  $E_b$  – энергия передачи одного бита информации. При декодировании кода требуется восстановить последовательность бит в решетке сверточного кода, которая может быть представлена как Марковский процесс.

Оптимальным декодером сверточных кодов является алгоритм, который минимизирует вероятность ошибки на слово и выбирает декодированное слово  $\mathbf{u}$  так, чтобы максимизировать вероятность  $P(\mathbf{r}|\mathbf{u})$ , то есть является декодером по максимуму правдоподобия

$$\hat{\mathbf{u}} = \underset{\mathbf{u}}{\operatorname{arg\,max}} P(\mathbf{r} | \mathbf{u}), \quad (2)$$

где  $\hat{\mathbf{u}}$  принятое решение о декодированном слове.

В случае минимизации вероятности ошибки на бит алгоритм является декодером по максимуму апостериорной вероятности и максимизирует вероятность  $P(u_i | \mathbf{r})$

$$\hat{u}_i = \underset{u_i}{\operatorname{arg\,max}} P(u_i | \mathbf{r}), \quad (3)$$

где  $\hat{u}_i$  принятое решение о декодированном бите.

Существует, так называемое, мягкое решение декодера, которое представляет логарифм отношения правдоподобий

$$L(\hat{u}_i) = \ln \frac{P(\hat{u}_i = 1 | \mathbf{r})}{P(\hat{u}_i = 0 | \mathbf{r})}. \quad (4)$$

Декодер принимает решение о бите  $\hat{u}_i = 1$  в случае  $L(\hat{u}_i) > 0$ , иначе  $\hat{u}_i = 0$ . В данном выражении переменные  $P(u_i = 1 | \mathbf{r})$  и  $P(u_i = 0 | \mathbf{r})$  еще называются надежностями бит 1 и 0, и определяются следующим образом

$$P(\hat{u}_i = 1 | \mathbf{r}) = \frac{1}{1 + e^{-L(\hat{u}_i)}} \quad \text{и} \quad P(\hat{u}_i = 0 | \mathbf{r}) = \frac{e^{-L(\hat{u}_i)}}{1 + e^{-L(\hat{u}_i)}}. \quad (5)$$

Используя правило Байеса вероятность  $P(\mathbf{u} | \mathbf{r})$  может быть выражена как

$$P(\mathbf{u} | \mathbf{r}) = \frac{P(\mathbf{r} | \mathbf{u}) P(\mathbf{u})}{P(\mathbf{r})}. \quad (6)$$

Значение  $P(\mathbf{r})$  одинаково для всех возможных  $\mathbf{u}$  и его можно опустить, так как оно является нормирующим коэффициентом. Также во многих случаях значения  $u_i$  считают равновероятными, что приводит к тому, что задача максимизации  $P(\mathbf{u} | \mathbf{r})$  сводится к задаче максимизации  $P(\mathbf{r} | \mathbf{u})$ , которую решает декодер. При этом

$$P(\mathbf{r} | \mathbf{v}) = \prod_{i=0}^{k-1} P(\mathbf{r}_i | v_i). \quad (7)$$

Структура классического кодера сверточного турбокода (кодер СТК) и итеративного декодера, рассматривается в [4]. Кодер СТК формирует систематический код, в котором проверочная группа образуется из проверочных бит, генерируемых двумя кодерами рекурсивных сверточных кодов (кодер РСК1 и РСК2). При этом помехоустойчивость турбокода обусловлена:

- применением перемежителя для изменения вида входной последовательности, подаваемой на входы кодеров РСК;
- зависимостью веса выходной последовательности РСК от вида входной информационной последовательности (от порядка расположения нулей и единиц в ней).

Итеративный декодер турбокода представляет последовательное соединение декодеров двух элементарных кодов (РСК1 и РСК2), так называемых декодеров с мягкими входным и выходным сигналом. Каждый элементарный декодер имеет два входа:

- вход для сигнала, представляющего собой мягкое решение демодулятора;
- вход для сигнала так называемой внешней информации, получаемой от декодера другого элементарного кода.

На рис. 2 представлена модель структуры канала управления БЛА для исследования его функционирования. Моделирование реализовано в программной среде MathLab. Данная модель позволяет задавать параметры кодового слова, характеристики кодера и декодера, параметры радиоканала.

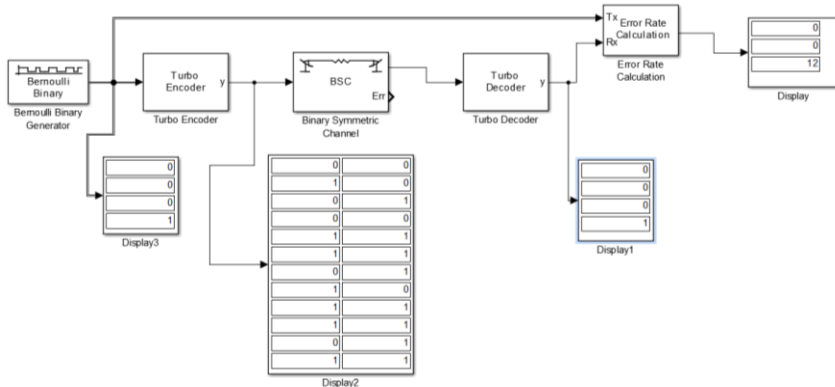


Рис. 2. Модель канала управления в среде MathLab

### **Заключение**

Таким образом рассмотрен подход к проведению исследования методов кодирования команд управления БЛА в интересах обеспечения помехозащищенности. Рассмотрена зависимость между выбором метода кодирования и формированием требований к разработке декодера. При проектировании декодера необходимо обратить внимание на производительность, что повлияет на формирование требований к построению приемного устройства на борту БЛА.

### **Список литературы**

1. Донченко, А. А. Обоснование требований к системе связи БЛА средней и большой дальности / А. А. Донченко, Д. С. Чиров // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – № 12. – С. 12-16.
2. Боев, Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с БЛА / Н. М. Боев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – Вып. 2 (42). – С. 86-91.
3. Krouk, E. Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications / E. Krouk, A. Ovchinnikov, J. Poikonen. – John Wiley and Sons, 2011. – P. 680.
4. Горбуков, Н. Д. Применение турбокодов в командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотным летательным аппаратом / Н. Д. Горбуков, С. Ф. Галиев // Актуальные вопросы состояния, эксплуатации и развития комплексов бортового радиоэлектронного оборудования воздушных судов. Проблемы подготовки специалистов / сб. науч. ст. по материалам V Всерос. научно-практической конф. «Авионика» (23–25 ноября 2021 г.). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2021. – С.61-63.